

# Лазерное формирование отверстий в неметаллических подложках

\*В. Л. Ланин, Ван Тунг Фам, Ньян Дат Чан

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, 220013, Беларусь, \*e-mail: [vlanin@bsuir.by](mailto:vlanin@bsuir.by)

Поступила 24.06.2019  
После доработки 27.09.2019  
Принята к публикации 27.09.2019

Предложено использование импульсного пикосекундного лазера с длиной волны 532 нм и частотой повторения 15 Гц для формирования отверстий диаметром до 0,1 мм в неметаллических подложках: кремнии, керамике и др. Моделированием в *MathCAD* и *COMSOL Multiphysics* установлено, что значение половинного угла раствора светового конуса, которое зависит от фокусировки лазерного излучения, оказывает значительное влияние на глубину и диаметр отверстий при лазерной обработке. Исследовано влияние режимов лазерной обработки наносекундным и пикосекундными лазерами с длинами волн 1064 и 532 нм на конусообразность и время формирования отверстий в кремниевых подложках. Предварительный нагрев подложки до 170–200°C сокращает время выполнения отверстий на 20%.

*Ключевые слова:* лазерное излучение, неметаллические подложки, кремний, отверстия

УДК 621.365(075.6)

DOI: 10.5281/zenodo.3640390

## ВВЕДЕНИЕ

Движущей тенденцией в микроэлектронике является стремление создавать все более сложные и функциональные изделия во все меньшем пространстве подложки, платы или корпуса. Достигается это за счет максимальной миниатюризации компонентов и укорачивания межсоединений, повышения предельных рабочих частот и распараллеливания систем обработки информации в одном приборе, переходе от плоских к «трехмерным» структурам и т.д. Интеграция систем происходит в виде многокристальных модулей, систем 3D-интеграции или вертикальной системной интеграции (*VSI*), которая характеризуется высокой плотностью выводов, проходящих через отверстия в кремниевых кристаллах. Технология *VSI* включает следующие этапы:

- формирование отверстий (методом лазерной прошивки или реактивного ионного травления);
- заполнение отверстий проводящим материалом (металлизацией, химическим осаждением);
- монтаж пластин друг на друга (совмещение и монтаж);
- утонение пластин до отдельных кристалльных сборок (шлифовка или травление).

Метод формирования сквозных отверстий имеет ряд преимуществ перед методом монтажа кристаллов на пластину. К ним относятся более высокая плотность монтажа, большая функциональность, лучшие характеристики (параллельность выводов, минимальная длина соединений, межсоединения не ограничивают скорость распространения сигнала), более низкое энергопотребление и меньшая стоимость конечного

изделия [1]. Однако создать отверстия необходимого диаметра с соответствующим технологическим требованиям уровнем качества традиционным сверлением в данный момент крайне трудно, а порой и невозможно.

Лазерная обработка отверстий – один из перспективных методов создания таких отверстий. При воздействии лазерного излучения в виде отдельного импульса образование отверстия происходит за счет плавления и испарения материала. Высокое качество отверстий обеспечивается при сверлении испаряющихся неметаллов, при разрушении которых под действием лазерного излучения жидкая фаза практически отсутствует. Основным методом повышения точности и качества лазерной размерной обработки является многоимпульсная обработка, когда отверстия в обрабатываемом материале формируются за серию импульсов излучения лазера определенной энергии и длительности, последовательно доводящих размеры отверстий до необходимых.

Одним из важнейших применений лазерной технологии в настоящее время является использование лазерного микрорезания в технологических процессах изготовления подложек из кремния и арсенида галлия с нанесенным на них покрытием; сапфировых подложек толщиной 90 мкм, используемых в мощных светодиодах и изготавливаемых миллионами штук; подложек из нитрида алюминия – в качестве радиаторов и из нитрида галлия – в лазерных диодах [2].

В настоящее время наиболее широкое применение в обработке материалов находят три типа лазеров: твердотельные на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом (ИАГ: *Nd*); твердотельные на

стекле с неодимом (Ст: Nd) и молекулярные (газовые) на диоксиде углерода  $\text{CO}_2$ . Преимущества твердотельных лазеров: высокая удельная мощность излучения; высокий КПД (с диодной накачкой) 20%; большая энергия (до кДж/импульс); широкий диапазон длин волн; широкий диапазон длительностей импульсов (от  $10^{-2}$  до  $10^{-14}$  с); возможность генерации ультракоротких импульсов (до 4 фемтосекунд) [3].

Особенности газового лазера определяются свойствами активной среды, плотность которой меняется в широких пределах (давление от  $1,3 \cdot 10^{-6}$  до  $10^5$  Па). Газовый лазер позволяет получать предельно узкие и стабильные линии генерации. Малая плотность активной среды определяет небольшие температурные изменения показателя преломления. Это дает возможность сравнительно легко получать предельно малую (дифракционную) расходимость излучения.

Большое значение в формировании отверстий при обработке плавящихся материалов единичным импульсом имеет перераспределение жидкой фазы до момента затвердевания. В результате этого форма отверстия может значительно отличаться от той, которая в момент окончания импульса определялась геометрией луча, кинетикой испарения и гидродинамикой выброса части материала в жидкой фазе.

Основными процессами, приводящими к образованию отверстий в материалах с использованием лазерного излучения, являются испарение и плавление вещества. По глубине отверстие растет за счет испарения, а по диаметру – за счет плавления стенок и вытеснения жидкости избыточным давлением паров. При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью материала часть излучения поглощается и рассеивается продуктами разрушения. Для получения сквозных отверстий в неметаллических материалах с заданной геометрией и качеством должны быть определены оптимальные параметры лазерного процесса – плотность мощности, частота лазерного импульса, диаметр луча и количество импульсов.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ

При падении пучка лазерного излучения на поверхность материала часть излучения отражается от нее, а часть проходит в глубь материала, поглощаясь в нем. Распространение излучения в веществе описывается законом Бугера:

$$q(x) = q_0(1 - R)\exp(-\alpha x), \quad (1)$$

где  $q(x)$  – плотность мощности излучения в веществе на расстоянии  $x$  от его поверхности;  $q_0$  – плотность мощности излучения;  $R$  – коэффициент отражения поверхности;  $\alpha$  – показатель ослабления излучения в веществе.

Микрообработка материалов лазерным излучением предъявляет требования к таким параметрам источника излучения, как длина волны  $\lambda$ , угловая расходимость  $\theta$  и длительность импульса  $\tau_n$  [4]. Зона воздействия, определяемая минимальными размерами лазерного пучка  $d$  в фокусе объектива, связана с длиной волны излучения соотношением:

$$d = 1,22\lambda(f / D_n)M^2, \quad (2)$$

где  $f$  – фокусное расстояние объектива;  $D_n$  – диаметр несфокусированного лазерного пучка, а  $M^2$  – коэффициент распространения луча, характеризующий отличие реального лазерного пучка от идеального гауссова пучка, имеющего минимальную дифракционную расходимость:

$$M^2 = 1 / 4(\theta\pi w_0\lambda), \quad (3)$$

где  $w_0$  – радиус гауссова пучка – радиус в точке, где интенсивность уменьшилась до  $1/e^2$  или 0,135 от ее значения на оси.

Таким образом, чем короче длина волны и меньше угловая расходимость, тем больше возможностей сфокусировать излучение и обеспечить минимально возможный размер зоны воздействия. Для более длинных импульсов величина зоны термического влияния равна:

$$\delta = 2(a\tau_n)^{1/2}, \quad (4)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, зависящий от теплофизических свойств материала.

Энергия излучения  $E$ , падающая на поверхность  $S$ , расположенную нормально к направлению распространения излучения, определяется соотношением:

$$E = Pt = qSt, \quad (5)$$

где  $P$  – мощность излучения;  $q$  – плотность мощности падающего излучения;  $t$  – время действия излучения.

При формировании отверстий свойства обрабатываемого материала существенно влияют на параметры лазера, необходимые для выполнения операции. Обработку осуществляют импульсными лазерами, работающими как в режиме свободной генерации с длительностью импульсов порядка 1 мкс, так и в режиме с модулированной добротностью длительностью в несколько десятков наносекунд. В обоих случаях



Рис. 1. Схема лазерного формирования отверстия.

Таблица 1. Параметры лазерного излучения

Входной диаметр отверстия, $d_0$	0,1–0,2 мм
Энергия лазера, $E$	0,5–2,0 Дж
Плотность мощности излучения, $q_0$	$10^7$ – $10^8$ Вт/м <sup>2</sup>
Длительность импульса, $\tau_{\text{и}}$	70–120 пс
Частота излучения, $f_{\text{и}}$	15 Гц
Половинный угол раствора светового конуса, $\gamma$	0–0,7 мрад

происходят тепловое воздействие на материал, его плавление и испарение из зоны.

В настоящее время достаточно полно разработана модель кинетики образования отверстия в непрозрачном материале (рис. 1), согласно которой глубина  $h$  и радиус отверстия определяются по формулам [5]:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\tan \gamma}\right)^3 + \frac{3E}{\pi \tan^3 \gamma \cdot \rho \cdot L_0}} - \frac{r_0}{\tan \gamma}, \quad (6)$$

$$r = \sqrt[3]{r_0^3 + \frac{3E \cdot \tan \gamma}{\pi \cdot \rho \cdot L_0}}, \quad (7)$$

где  $r_0$  – входной радиус отверстия,  $r_0 = D_0/2$ ;  $r$  – выходной радиус отверстия ( $D = 2r$ ),

$E = Pt = \sum_{i=1}^n E_i$  – усредненная энергия излучения

импульсного оптического квантового генератора (ОКГ);  $P$  – мощность лазера;  $t$  – время воздействия;  $E_i$  – энергия одного импульса;  $\gamma$  – половинный угол раствора светового конуса:  $\gamma = \theta/2$ ;  $L_0$  – удельная энергия испарения материала.

Для многоимпульсного режима обработки характерно снижение доли расплава в продуктах разрушения. Такой режим используется для получения прецизионных или максимально глубоких отверстий. Таковым, по существу, является режим обработки серией коротких импульсов микросекундной или наносекундной длительности.

Анализируя выражения (6) и (7), можно показать, что на начальной стадии процесса

образования лунки ( $h \ll r_0$ ) ее глубина растет линейно во времени за счет испарения материала по площади светового пятна (как в одномерной модели квазистационарного испарения), а диаметр меняется слабо. С течением времени скорость роста лунки в глубину замедляется, в предельном случае ( $t \rightarrow \infty$ ) ее глубина и радиус растут пропорционально  $t^{1/3}$ , то есть форма лунки не меняется. Однако в большей мере величины  $h$  и  $D$  зависят от  $\tan \gamma$ , характеризующего угол светового конуса, создаваемого оптической системой. В качестве параметра, отличающего данный процесс, можно использовать конусообразность отверстия:

$$k = \frac{D_0 - D}{h}. \quad (8)$$

Моделирование диаметра отверстий при лазерной обработке в кремниевой подложке с помощью прикладного пакета *MathCAD* позволило получить зависимости выходного диаметра отверстия от энергии излучения импульсного ОКГ и половинного угла раствора светового конуса при различных начальных диаметрах  $D_0$  и исходных данных (табл. 1).

Выражение, описывающее зависимость энергии при различных значениях диаметра пятна излучения на поверхности обрабатываемого материала, имеет вид:

$$E = 0,785q_0d^2t, \quad (9)$$

где  $d$  – диаметр пятна фокусированного излучения.

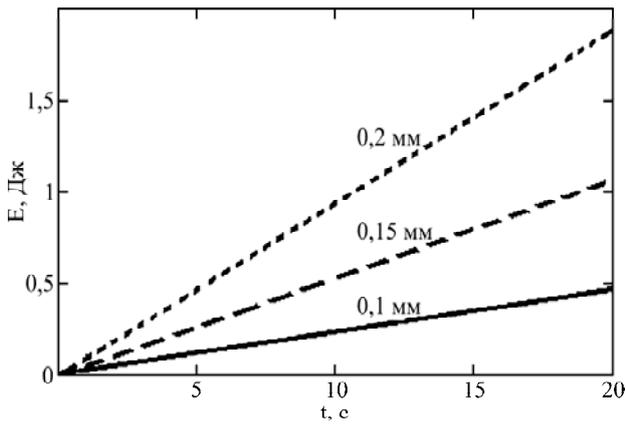


Рис. 2. Зависимости энергии лазерного излучения в зоне обработки от времени нагрева и диаметра пятна излучения.

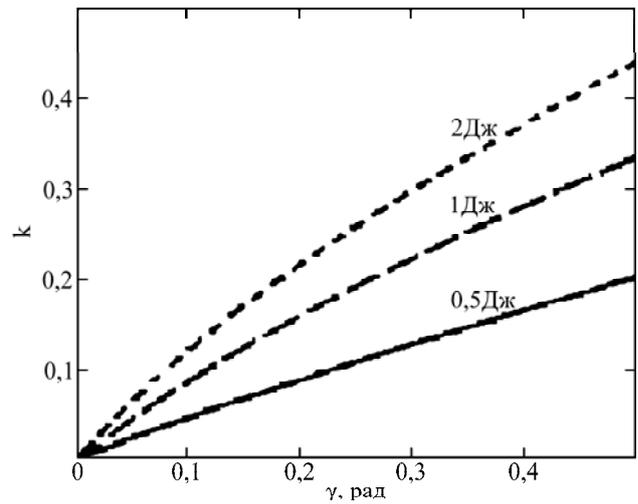


Рис. 3. Зависимости конусообразности отверстия от половинного угла раствора светового конуса и энергии лазерного излучения.

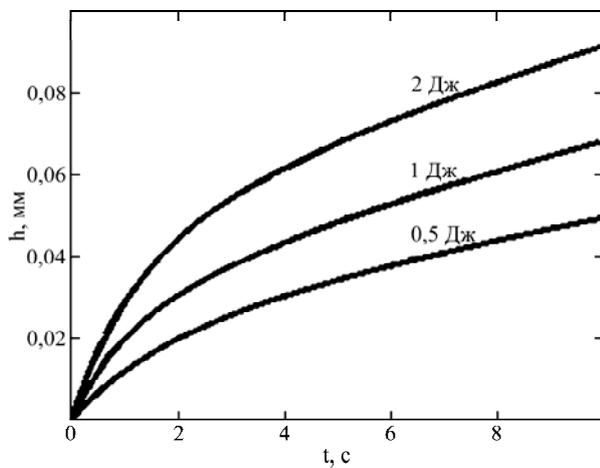


Рис. 4. Зависимости глубины и диаметра входного отверстия от времени облучения и энергии лазерного излучения.

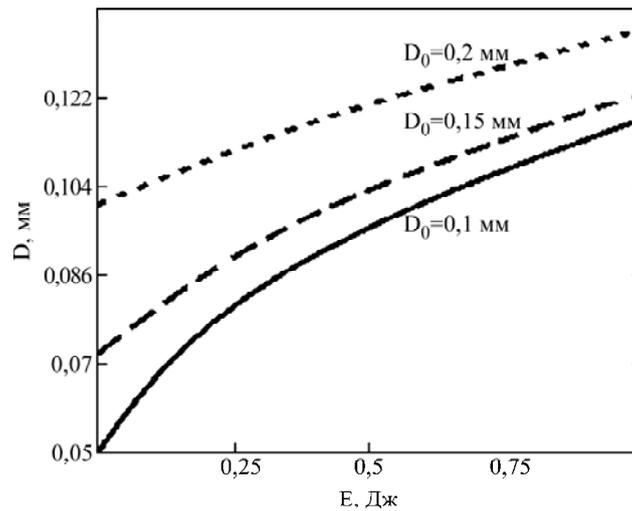
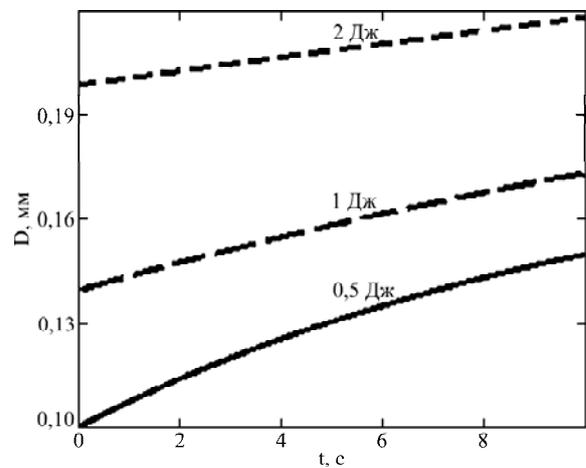


Рис. 5. Зависимость входного диаметра  $D$  от энергии и диаметра пятна излучения.

Зависимость лазерной энергии в зоне обработки от времени и диаметра луча показана на рис. 2. Из графика видно, что энергия, падающая на обрабатываемый материал, линейно зависит от времени облучения. При увеличении диаметра зоны излучения энергия увеличивается экспоненциально: за 15 с достигла 1,4 Дж при  $D = 0,2$  мм и только 0,3 Дж при  $D = 0,1$  мм.

Если глубина  $h$  равна толщине подложки, то есть  $h = 250$  мкм, то при плотностях мощности излучения лазера  $0,5 \cdot 10^5 - 1,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> и диаметре луча  $d = 0,2$  мм энергия излучения находится в диапазоне  $E = 4-12$  Дж. На рис. 3 отмечены зависимости конусообразности отверстия от половинного угла  $\gamma$ , а на рис. 4 –

глубины и диаметра отверстия от времени воздействия.

Таким образом, для получения отверстия с меньшей конусообразностью необходимо уменьшать значения половинного угла  $\gamma$ . Однако получение глубоких узких отверстий является довольно трудной задачей, которая упрощенно решается в предельном случае, когда  $\tan \gamma = 0$ .

На начальной стадии процесса формирования отверстия, когда  $h(t) < D(t)$ , глубина отверстия  $h$  растет линейно со временем, а диаметр  $D$  остается постоянным. После этого рост отверстия в глубину замедляется, его диаметр, наоборот, начинает увеличиваться в зависимости от энергии и диаметра пятна излучения (рис. 5). На этой стадии развития отверстия необходимо учитывать движение расплава и взаимное расположение поверхности материала и сфокусированного пучка излучения.

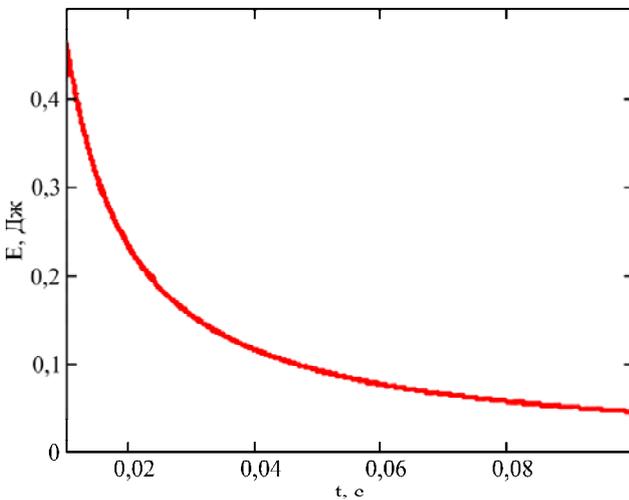


Рис. 6. Зависимость энергии лазерного излучения в зоне обработки от времени формирования отверстия.

Однако фундаментальной особенностью взаимодействия лазерного излучения в очень быстром импульсном режиме является то, что тепло, создаваемое излучением в материале, не успевает отойти от зоны излучения во время лазерного импульса. Продолжительность лазерного импульса короче времени тепловой диффузии. При высокой удельной мощности в зоне излучения процесс лазерной абляции сопровождается испарением материала, минуя стадию плавления [6]. При этих допущениях время, требуемое для формирования отверстия в подложке, равно:

$$t(E) = \frac{\pi \tan^2 \gamma \cdot \rho \cdot L_H \cdot \left[ \left( h + \frac{r_0}{\tan \gamma} \right)^3 - \left( \frac{r_0}{\tan \gamma} \right)^3 \right]}{3 \cdot E_u \cdot f}. \quad (10)$$

Для моделирования приняты значения:  $r_0 = 0,05$  мм,  $\gamma = \theta/2 = 0,2$  мрад,  $h = 250$  мкм. При этом не учитывается влияние длины волны

на время формирования отверстия. Как видно из рис. 6, время формирования отверстия нелинейно зависит от энергии лазерного импульса.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Выбор технологических режимов при формировании отверстий лазерным лучом основывается на учете свойств обрабатываемого материала: коэффициенте поглощения и отражательной способности при данной длине волны лазерного излучения, определяющих процесс поглощения энергии; удельной теплопроводности и температуропроводности, тепловой поток в материале; плотности, удельной теплоемкости, скрытой теплоты и температуры фазового перехода, энергоемкость процесса перехода материала в жидкое состояние. При выборе режимов необходимо учитывать влияние энергетических и временных характеристик лазерного излучения [7].

Для лазерного формирования отверстий в кремниевой подложке использовались лазерные установки компании LOTIS ТП с длиной волны 1,06 мкм и 532 нм, длительностью импульсов в диапазоне 80–15 нс и частотой импульсов 15 Гц. Источником лазерного излучения являлся лазер LS-2151 – полностью твердотельный лазер на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом (Nd:YAG) с активной синхронизацией мод МОРА-конфигурации, отдельным управлением уровнем накачки задающего генератора и усилителя в едином блоке; автономной системой охлаждения с теплообменником вода-воздух; термостабилизацией электрооптических элементов, синхронизатора мод и кристалла второй гармоники; встроенными генератором второй гармоники (SH) и фотодатчиками задающего генератора, усилителя и генератора второй гармоники с индикацией энергии в окне управляющей программы [8].

Оптическая система формировала пространственные характеристики пучка как инструмента обработки. Фокусное расстояние составляло 150 мм. Для наводки оптического излучения и центрирования оптической системы использовался маломощный газовый лазер, излучение от которого вводилось в оптическую систему формирования лазерного излучения с помощью полупрозрачного зеркала.

Для позиционирования изделий применен координатный стол с двумя степенями свободы и точностью  $\pm 0,01$  мм. Управление работой лазера и координатного стола организовано от компьютера. Для отключения лазера использовался блок управления с помощью фотодатчика,

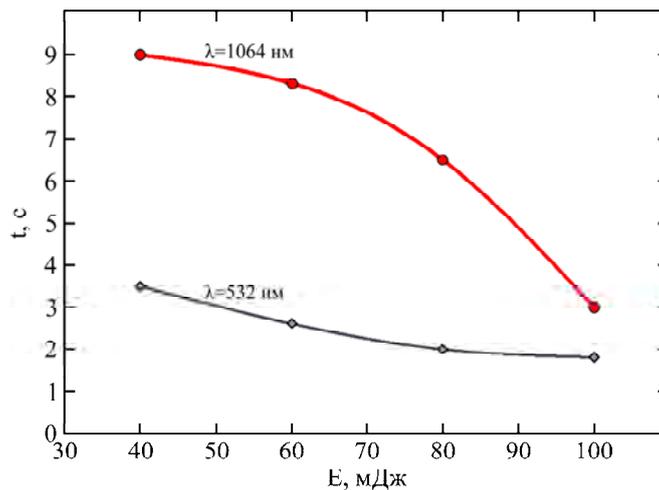


Рис. 7. Зависимости времени прошивки отверстия от энергии и длины волны лазерного излучения.

находящегося под подложкой. Кремниевую подложку устанавливали на кольцевую подставку, которая закреплена на координатном столе. Нестабильность мощности излучения была не более 3,5%, а при расходимости излучения 0,4 мрад нестабильность размеров зоны излучения на поверхности подложки не более 2%. В процессе исследования диаметр луча изменялся в пределах 0,1–0,2 мм (1 мм = 70 усл. делений), скорость перемещения подложки – 7–10 мм/с. Качество сквозных отверстий оценивали с помощью микроскопа при увеличении 32<sup>x</sup>.

Для контроля мощности лазерного излучения применен измеритель мощности излучения *LabMax-Top* (компании *COHERENT*) с сенсорами *EnergyMax*, который обеспечивает контроль излучения с длиной волны от 190 нм до 12 мкм, измерения мощности от нВт до кВт, энергии от нДж до Дж при частоте импульсов до 10 кГц.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследован процесс лазерного формирования отверстий при диаметре пятна излучения  $d_{\text{пл}} = 0,1$  мм, входных диаметрах отверстия в диапазоне с 0,1 до 0,12 мм и толщине кремниевой подложки 250 мкм. Мощность лазера *LS-2145* наносекундного с длиной волны 1064 нм находилась в диапазоне 40–100 мВт. Мощность пикосекундного лазера *LS-2151* с длиной волны 532 нм изменялась в диапазоне 5,6–22 мВт.

Пикосекундный лазер с длиной волны 532 нм позволяет сократить время обработки по сравнению с наносекундным лазером. При использовании излучения пикосекундного лазера, создающего плотность мощности излучения  $q = 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>, концентрация свободных электронов на поверхности подложки материала достигает  $N \sim 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. При воздей-

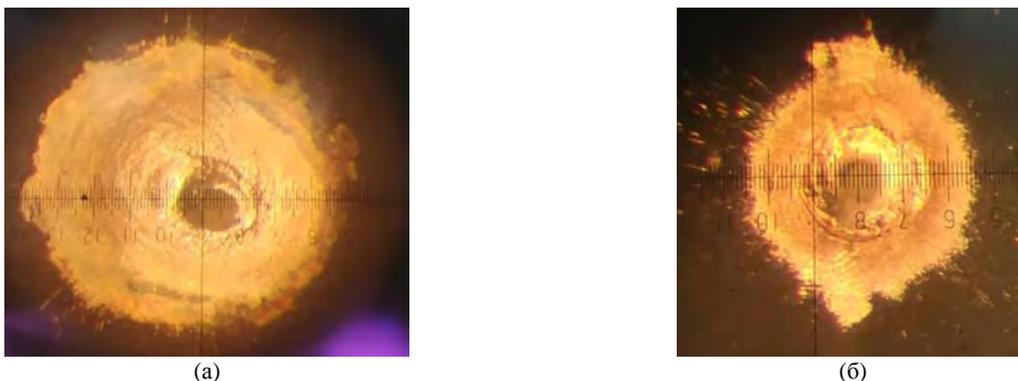
ствии излучения в зоне обработки электроны получают энергию и переходят на различные уровни зоны проводимости, а затем полученная энергия трансформируется в тепловую.

Исследовано влияние длины волны лазера на время лазерного формирования отверстий в кремнии и керамике с использованием пикосекундных лазеров с длиной волны 1064 и 532 нм. Получена экспериментальная зависимость длительности обработки кремниевой пластины от энергии и длины волны лазерного излучения (рис. 7).

Установлено, что при одинаковом времени формирования отверстия  $t = 3$  с требуется энергия лазерного излучения с длиной волны 1064–100 мДж, а с длиной волны 532 нм – в 10 раз меньше (около 10 мДж). При одинаковой энергии излучения лазер с длиной волны 532 нм сокращает время формирования отверстия примерно в 2 раза. Применение пикосекундного лазера с длиной волны 532 нм более эффективно, поскольку не только сокращается время обработки, но и улучшается качество формируемого отверстия в кремниевой подложке, при этом зона термического влияния уменьшается на 30–40% (рис. 8).

В табл. 2 приведены параметры формирования отверстий наносекундным лазером в кремниевой подложке толщиной 250 мкм. Отмечено, что на длине волны 532 нм с увеличением мощности излучения до 100 мВт улучшается качество отверстий. Конусообразность отверстий при мощности 40 мВт составляла 0,168, а затем снижалась на 25% при мощности 100 мВт. При длине волны 1064 нм при повышении мощности с 40 до 100 мВт конусообразность увеличивалась примерно в 3 раза.

Формирование отверстий на лазерной установке *LS-2151* (пикосекундный лазер) в сравнении с наносекундным лазером дает возможность получения отверстий с минимальной конусообразностью при меньшей энергии излучения (табл. 3).



**Рис. 8.** Внешний вид отверстий, сформированных в кремниевой подложке лазерным излучением с длиной волн 1064 нм (а) и 532 нм (б).

**Таблица 2.** Параметры лазерного формирования отверстий в подложке наносекундным лазером

Длина волны	Мощность, мВт	Входное отверстие, усл. дел.	Выходное отверстие, усл. дел.	Конусообразность
532 нм	100	11	9	0,115
	80	10	8	0,115
	60	9	6	0,171
	40	8	5	0,171
1064 нм	100	24	18	0,342
	80	22	18	0,228
	60	20	18	0,115
	40	18	16	0,115

**Таблица 3.** Параметры лазерного формирования отверстий в подложке пикосекундным лазером

Мощность, мВт	Входное отверстие, усл. делений	Выходное отверстие, усл. делений	Конусообразность
22	8	6	0,114
10	6	4	0,114
5,6	7	4	0,168

**Таблица 4.** Площадь входного отверстия в подложке

Время формирования, с	Площадь входного отверстия, мм <sup>2</sup>	
	Без нагрева	С нагревом
30	0,36	0,45
40	0,495	0,55
45	0,44	0,57
50	0,5	0,7
60	0,58	0,72

При лазерной обработке большую роль играет теплопередача в материал подложки. Важным фактором, определяющим скорость теплопередачи и структуру материала, является начальная температура материала. Поэтому для улучшения качества и эффективности лазерной обработки необходимо учитывать влияние начальной температуры подложки на время лазерного формирования отверстий. Для исследования влияния нагрева на процесс лазерного формирования отверстий предложен предварительный подогрев неметаллической подложки до определенной температуры. Предполагается, что при оптимальном времени для заданной

толщины подложки площадь отверстия, формируемого в неметаллической подложке с более высокой начальной температурой, достигнет большего значения, чем отверстия, получаемого без нагрева. Условия исследования являлись следующими:

- температура инфракрасного нагревателя 700–750°C;
- скорость нагрева подложки 3–5°C/с;
- предварительная температура нагрева подложки 170–200°C;
- время нагрева 30–60 с;
- кремниевая пластина: диаметр 40 мм, толщина 300 и 500 мкм;

– мощность лазерного излучения до 6 Вт.

Результаты исследования приведены в табл. 4. Отмечено сокращение времени обработки отверстий с предварительным нагревом: площадь отверстия достигает  $0,55 \text{ мм}^2$  за 40–45 с на нагреваемой подложке и за 50 с без нагрева.

Однако для оптимизации процесса необходимо исследовать также влияние предварительного нагрева на геометрию отверстия, то есть его конусообразность. Правильный выбор режимов обработки позволяет перейти от получения черновых отверстий к получению чистовых, точность размеров которых достигает 7-го качества.

### ВЫВОДЫ

Предложено использование импульсного пикосекундного лазера с длиной волны 532 нм и частотой повторения 15 Гц для формирования отверстий диаметром до 0,1 мм в неметаллических подложках: кремнии, керамике и др., что позволяет сократить время обработки в 2 раза и уменьшить зону термического влияния на 30–40% по сравнению с наносекундным лазером.

Моделированием в *MathCAD* и *COMSOL Multiphysics* параметров лазерного формирования отверстий в кремниевой подложке получены зависимости конусообразности отверстий от энергии и диаметра пятна лазерного излучения. Установлено, что значение угла  $\gamma$ , которое зависит от фокусировки лазерного излучения, имеет значительное влияние на глубину и диаметр отверстий при лазерной обработке в кремниевых подложках. При уменьшении радиуса лазерного излучения растет температура нагрева в зоне обработки ввиду большей концентрации энергии излучения.

Разработана методика лазерного формирования отверстий в неметаллических подложках с использованием инфракрасного нагревателя для предварительного нагрева неметаллической подложки до 170–200°C, что сокращает время выполнения отверстий на 20%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мухина Е., Башта П. *Электроника. Наука. Технология. Бизнес.* 2009, (2), 92–93.
2. Wolfgang S., Reinhart P. *J Laser Appl.* 2013, (25), 3–22. doi 10.2351/1.4773837.
3. Kreutz E.W., Horn A., Poprawe R. *Appl Surf Sci.* 2005, **248**(1–4), 66–70. doi 10.1016/j.apsusc.2005.03.034
4. Вакс Е.Д., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г. *Практика прецизионной лазерной обработки.* М.: Техносфера, 2013. 696 с.
5. Вейко В.П., Либензон М.Н., Червяков Г.Г. *Взаимодействие лазерного излучения с веществом.* М.: Физматлит, 2008. 181 с.
6. Madou M.J. *Fundamentals of micro-fabrication and nanotechnology, volume II. Manufacturing Techniques for Micro-fabrication and Nanotechnology.* New York: CRC Press, 2011. 658 p.
7. Соколова Т.Н., Сурменко Л.А. *Лазерная размерная обработка материалов, применяемых в электронной технике.* Обзоры по электронной технике. М.: ЦНИИТИ. 1986. 71 с.
8. Ланин В.Л., Волк С.А., Первенецкий А.П. *Технологии в электронной промышленности.* 2019, (2), 57–59.

### Summary

The use of a picosecond pulsed laser with a wavelength of 532 nm and frequency of 15 Hz in the formation of holes with a diameter of up to 0.1 mm in non-metallic substrates: silicon, ceramics, etc., reduced the processing time twice and the heat-affected zone by 30–40% compared with a nanosecond laser. By modeling in *MathCAD* and *COMSOL Multiphysics*, it was found that the half-angle value of a light cone solution, which depends on the focus of the laser radiation, has a significant effect on the depth and diameter of holes in laser processing. A reduction in the execution time of holes by 20% with preliminary heating of the substrate to 170–200°C was noted.

*Keywords:* laser radiation, non-metallic substrates, silicon, holes